

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.020

油纸绝缘缺陷局放 UHF 抗干扰定位及优化布置方法

董冰冰, 李秉华, 高常胜

(合肥工业大学(新能源利用与节能安徽省重点实验室), 安徽 合肥 230009)

摘要:特高频(ultra high frequency, UHF)局放检测是变压器油纸绝缘缺陷定位的常用方法,实际应用过程中局放定位准确性易受噪声和传感器布置方式影响。为保证变压器油纸绝缘缺陷局放定位检测有效性,文中首先建立油纸绝缘缺陷 UHF 局放定位检测平台,在常规 K-means 方法的基础上,提出基于修正聚类分界的变压器油纸绝缘缺陷局放抗干扰定位方法,有效降低了定位误差。然后针对样本聚类分界混叠问题,选择最优修正系数 L 为 1.1 时, UHF 局放定位误差可减小至 0.1 m 内,验证了文中方法的有效性。最后分析不同传感器布置方式的定位误差变化规律,提出变压器油纸绝缘缺陷检测用 UHF 传感器优化布置方案,可为变压器局放在线监测传感器布置及定位提供参考。

关键词:变压器;油纸绝缘缺陷;特高频(UHF)检测;抗干扰;局放定位;聚类分界

中图分类号:TM854

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)01-0181-11

0 引言

变压器作为变电站的核心设备,承载着输、配电和变换电压等级的重任,在配电网中占有举足轻重的地位^[1-6]。但目前变压器油纸绝缘缺陷局放检测智能化程度低,局放定位准确性无法满足状态监测要求^[7-12]。变压器一旦发生故障,将引发停电事故,极有可能引起配电网频繁停电和低电压问题,造成巨大经济损失和不良社会影响^[13-18]。

变压器油纸绝缘缺陷定位是故障诊断的关键环节,目前常采用到达时间差(time difference of arrival, TDOA)特高频(ultra high frequency, UHF)定位法,对缺陷位置进行精准定位。TDOA 法是通过布置的多个 UHF 传感器,估计每个 UHF 脉冲信号的到达时刻(time of arrival, TOA),计算信号时间差,由于 UHF 信号属于电磁波信号,其传播速度为 3×10^8 m/s,故可通过传感器相对位置得出局放源位置^[19-21]。但 TDOA 法需要高速同步信号采集设备获取纳秒级别的 TDOA,并且在多数情况下,油纸绝缘缺陷的局放信号极易淹没于现场干扰信号中,导致 TDOA 的计算误差较大,影响局放定位准确性。为此,文献[22]根据 TDOA 得出定位方程组,通过求解复数域牛顿迭代算法,变压器绕组上的局放缺陷定位精度可达到 0.34 m。文献[23]提出线性预测法与广义互相关法结合的 TDOA 计算方法。文献[24]提出基于测量偏差的局放超声定位方法,减小了 TDOA 法对局放定位的影响,但以上方法局放信

号起始时刻容易受噪声干扰,导致 TDOA 计算误差明显增大,定位精度较低,难以保证局放定位的有效性。变压器局放缺陷定位准确性不仅受干扰信号影响,还与传感器布置方式等因素有关^[25-29]。为保证局放定位精度,文献[30-31]基于 UHF 传感阵列分析布置方式对变电站局放定位的影响,但无法适用于 UHF 传感器个数较少且布置方式不同的变压器 UHF 局放监测。

为提高变压器油纸绝缘缺陷局放定位有效性,文中综合考虑传感器布置方式和抗干扰定位方法,首先建立变压器典型油纸绝缘缺陷 UHF 局放定位检测平台,获得典型油纸绝缘缺陷(尖端、悬浮和沿面)以及不同传感器布置方式的 UHF 信号数据样本,提出基于修正聚类分界的油纸绝缘缺陷局放抗干扰定位方法;然后与常规 K-means 方法结果进行对比,验证文中方法的有效性;最后分析不同传感器布置方式的定位误差变化规律,提出传感器优化布置方案。文中研究可为变压器局放在线监测的传感器布置及定位提供参考。

1 试验平台及方法

为提高变压器油纸绝缘缺陷局放检测的 UHF 局放定位有效性,搭建局放定位检测平台如图 1 所示,该平台包含了无局放工频电压源、油纸绝缘缺陷模型和 UHF 局放测量系统。文中设计了尖端、悬浮及沿面 3 种典型变压器油纸绝缘缺陷模型,如图 2 所示,可模拟实际变压器中的金属突出物、不可靠接地等常见故障隐患^[32]。绝缘缺陷模型采用 105 °C 下真空烘干的 0.5 mm 厚魏德曼绝缘纸板,变

收稿日期:2023-09-18;修回日期:2023-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107142)

压器注入老化油并静置 48 h, 缺陷模型各部分均浸入 25 号变压器油。通过无局放工频电压源向缺陷模型施加电压, UHF 传感器检测油纸绝缘缺陷的局放信号。文中干扰信号主要来源于高压实验室中的随机脉冲型干扰, 用于模拟现场中的白噪声和随机脉冲干扰。

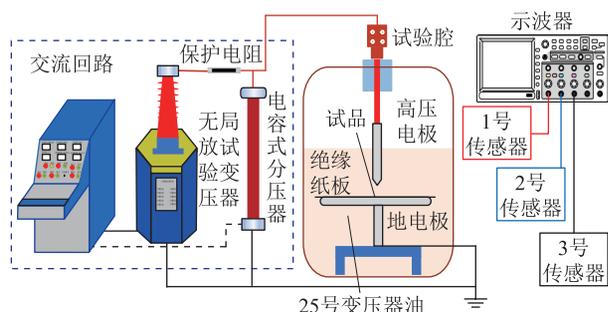


图1 油纸绝缘缺陷 UHF 局放定位检测平台

Fig.1 UHF partial discharge positioning detection platform for oil-paper insulation defects

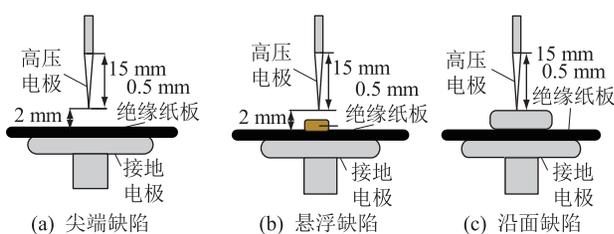


图2 油纸绝缘缺陷模型

Fig.2 Model of oil-paper insulation defects

UHF 传感器检测频率带宽为 300~510 MHz, 增益为 50 dB, 试验中所有 UHF 传感器参数相同。采用 YOKOGAWA 3054 高速示波器对 UHF 信号进行采集存储, 示波器采样率最高可达 2.5 GS/s, 其频率带宽为 5 000 MHz, 拥有 4 个模拟信号通道。

为获得不同传感器布置方式对局放定位误差的影响规律, 考虑实际变压器油纸绝缘缺陷局放检测传感器布置位置及个数有限^[7], 文中选择了 3 个 UHF 传感器, 4 种传感器布置方式如图 3 所示。1 号传感器与 2 号传感器分别布置在 x 轴和 y 轴处, 改变 3 号传感器位置以模拟传感器布置分散程度。以 y 轴为基准, 布置方式①为 3 号传感器顺时针间隔 45° ; 布置方式②为 3 号传感器逆时针间隔 45° ; 布置方式③为 3 号传感器逆时针间隔 90° ; 布置方式④为 3 号传感器逆时针间隔 135° 。传感器间隔角度(1 号与 2 号传感器, 2 号与 3 号传感器, 1 号与 3 号传感器)依次为: 布置 1 ($90^\circ, 315^\circ, 45^\circ$); 布置 2 ($90^\circ, 45^\circ, 135^\circ$); 布置 3 ($90^\circ, 90^\circ, 180^\circ$); 布置 4 ($90^\circ, 135^\circ, 225^\circ$)。4 种传感器布置方式的分散程度依次增加。试验时, 每种传感器布置方式测量采

集 750 个数据样本。

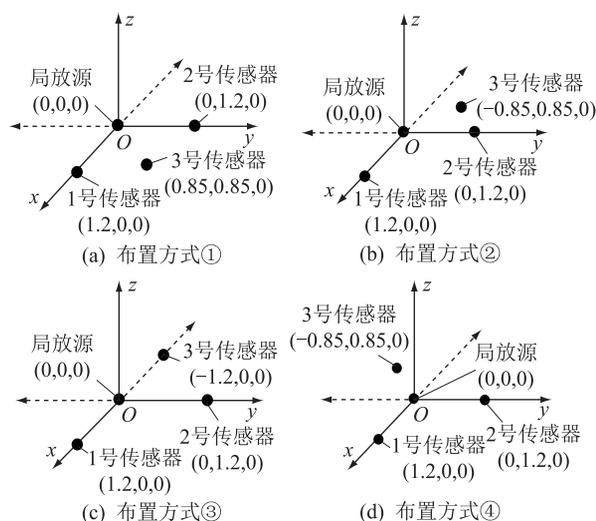


图3 传感器位置示意

Fig.3 Schematic diagram of sensor location

试验过程中, 首先在模拟变压器腔体内安装油纸绝缘缺陷模型, 然后注入变压器油直至浸没缺陷位置, 最后在缺陷模型周围分别按以上 4 种传感器布置方式布置多个 UHF 传感器, 通过同轴电缆将各个 UHF 传感器与高速示波器连接, 同步检测 UHF 信号。为验证局放缺陷模型设置有效性, 试验前采用 UHF 在线监测装置分别对不同缺陷的 UHF 局放信号进行检测, 对其局部放电相位分布 (phase resolved partial discharge, PRPD) 进行图谱分析, 验证对应缺陷的 UHF 检测有效性。

2 油纸绝缘缺陷局放抗干扰定位方法

2.1 油纸绝缘缺陷 UHF 信号特征选取

2.1.1 时域特征选取

油纸绝缘缺陷的 UHF 信号可分为 UHF 局放信号和干扰信号, 其中油纸尖端、悬浮及沿面缺陷的 UHF 信号如图 4 所示。对比 UHF 局放信号和干扰信号可知, 局放信号的脉冲起始时刻之前的电压值较小, 且波形振荡平缓, 而干扰信号电压值振荡较大。对比 3 种典型油纸绝缘缺陷, 悬浮缺陷干扰信号脉冲起始时刻之前振荡幅度最大, 其他 2 种缺陷虽然相对较小, 但与无干扰 UHF 局放信号相比, 其仍无法进行 TDOA 的精确计算。由此可知干扰信号的局放起始时刻受噪声影响较为严重, 难以准确计算局放起始时刻和 TDOA。

读取 UHF 信号首波的 TOA 常用方法有能量累积函数法、互相关法和阈值法^[33]。由图 4 可知, 当 UHF 检测试验中存在空间干扰时, UHF 局放信号和干扰信号时域特征存在明显差异。文中选取信号

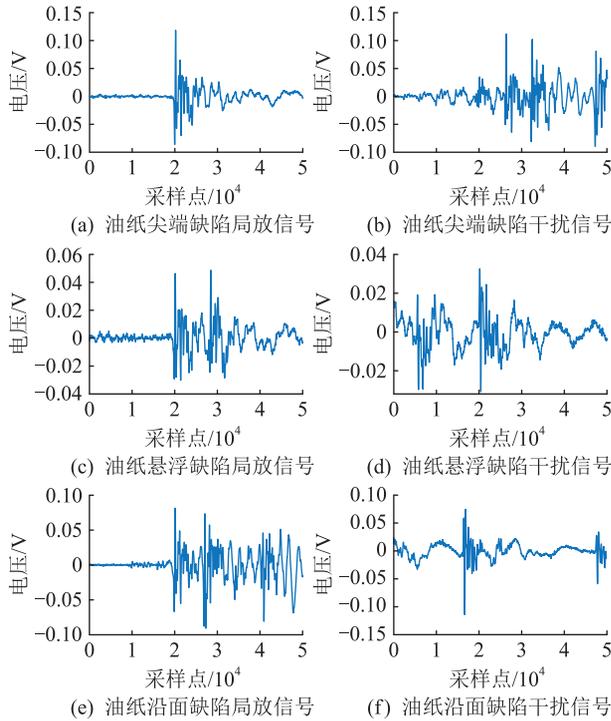


图4 油纸绝缘缺陷 UHF 信号

Fig.4 UHF signals of oil-paper insulation defects

能量累积函数作为时域特征参数,能量累积计算是局放起始时刻和 TDOA 计算的关键步骤,进一步提高了局放定位的计算效率和有效性。能量累积函数^[34-35]为:

$$Z(x') = \int_{x_i}^x \frac{u^2(x')}{R} dx' \quad (1)$$

式中: x 为选定信号段的最终时刻; x_i 为信号采集起始时刻; $u(x')$ 为 x' 时刻的 UHF 信号电压值; R 为采集系统的输入阻抗。当未出现 UHF 信号时,背景信号的能量累积函数很小,出现 UHF 信号后能量累积迅速增大出现拐点,拐点对应的时刻即为首波时刻。由于局放起始时刻前背景信号幅值较小且在零值上下波动,而 UHF 信号幅值较大,对信号进行平方处理,可进一步放大背景信号与 UHF 信号幅值差异,从而达到抑制干扰信号的目的。

对采集的油纸绝缘缺陷 UHF 信号样本进行时域特征统计,不同传感器布置方式下的 UHF 信号时域特征如表 1—表 3 所示。分析 3 种典型油纸绝缘缺陷下 UHF 信号时域特征值统计结果可知,时域特征值主要分布在 2 个数值区间。其中,油纸尖端缺陷分布在 $(0, 0.02)$ 和 $(0.02, 0.30)$ 区间;油纸悬浮缺陷分布在 $(0, 0.03)$ 和 $(0.03, 0.30)$ 区间;油纸沿面缺陷分布在 $(0, 0.04)$ 和 $(0.04, 0.28)$ 区间。由此可知 3 种典型油纸绝缘缺陷的局放和干扰信号能量累积函数值存在差异,分别将 3 种典型油纸绝缘缺陷的

3 组信号进行局放信号和干扰信号识别。由图 4 中油纸绝缘缺陷 UHF 信号的时域特征可知,干扰信号和局放信号的累积能量存在较大差异,故 UHF 信号累积能量可作为干扰抑制的时域特征值。

表 1 油纸尖端缺陷 UHF 信号时域特征

Table 1 Time domain characteristics of oil-paper tip defect UHF signal

| 时域特征值 | 不同传感器布置方式的信号样品占比/% | | | |
|----------------|--------------------|----|----|----|
| | ① | ② | ③ | ④ |
| $(0, 0.02)$ | 94 | 90 | 88 | 84 |
| $(0.02, 0.30)$ | 6 | 10 | 12 | 16 |

表 2 油纸悬浮缺陷 UHF 信号时域特征

Table 2 Time domain characteristics of oil-paper suspension defect UHF signal

| 时域特征值 | 不同传感器布置方式的信号样品占比/% | | | |
|----------------|--------------------|----|----|----|
| | ① | ② | ③ | ④ |
| $(0, 0.03)$ | 93 | 91 | 86 | 88 |
| $(0.03, 0.30)$ | 7 | 9 | 14 | 12 |

表 3 油纸沿面缺陷 UHF 信号时域特征

Table 3 Time domain characteristics of oil-paper surface defect UHF signal

| 时域特征值 | 不同传感器布置方式的信号样品占比/% | | | |
|----------------|--------------------|----|----|----|
| | ① | ② | ③ | ④ |
| $(0, 0.04)$ | 95 | 92 | 87 | 85 |
| $(0.04, 0.28)$ | 5 | 8 | 13 | 15 |

2.1.2 频域特征选取

为进一步分析油纸绝缘缺陷局放信号和干扰信号差异,对局放信号和干扰信号进行频谱转换分析结果如图 5 所示。油纸尖端局放信号频谱分布主要在 $0 \sim 75$ MHz 频段,干扰信号频谱主要分布在 $0 \sim 30$ MHz 频段。油纸悬浮局放信号频谱主要分布在 $40 \sim 180$ MHz 频段,干扰信号频谱主要分布在 $0 \sim 25$ MHz 频段。油纸沿面局放信号频谱主要分布在 $70 \sim 140$ MHz 频段,干扰信号频谱主要分布在 $0 \sim 40$ MHz 频段。由此可知,局放信号和干扰信号的频域特征具有较大差异,可通过频谱分布差异进行干扰信号的抑制。功率谱密度作为表征信号的功率能量与频率关系的物理量,可在统计意义上反映信号频谱特性,表征频谱分布差异,因此文中选取 UHF 频谱信号的功率谱密度作为干扰抑制的频域特征参数。

文中首先对 UHF 信号的功率谱密度进行求解分析,设 UHF 时域信号为 $s(t)$, UHF 时域信号的频谱 $S(f)$, 然后进行功率谱密度 $P(f)$ 计算^[36]。

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2)$$

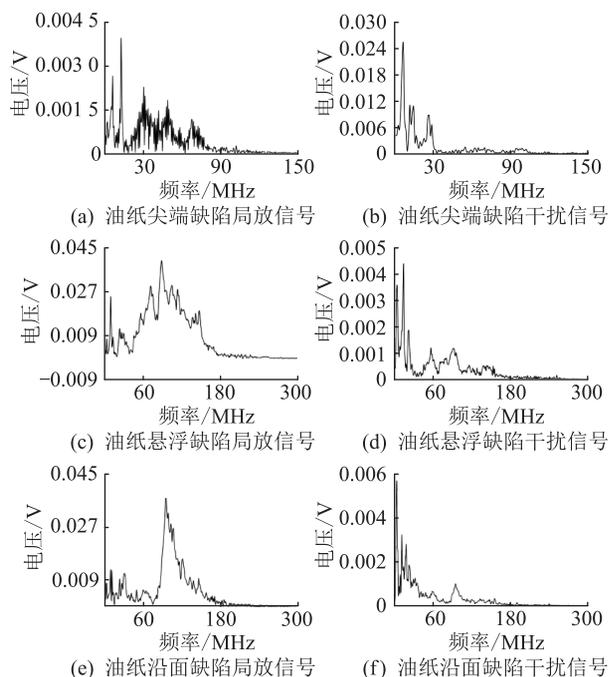


图5 油纸绝缘缺陷 UHF 信号频谱分析

Fig.5 UHF signal spectrum analysis of oil-paper insulation defects

$$P(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 \delta(f - nf_0) \quad (3)$$

式中： t 为时间； δ 为选取的频域区间； f 为信号频率； nf_0 为信号 n 次谐波频率；UHF 时域信号 $s(t)$ 通过式(2)转换成频域信号 $S(f)$ ，再通过式(3)计算信号功率谱密度。

对油纸绝缘缺陷 UHF 信号进行功率谱密度特征参量统计，不同传感器布置方式的油纸绝缘 UHF 信号频域特征如表 4—表 6 所示。分析典型油纸绝缘缺陷下的 UHF 信号频域特征值统计结果可知，频域特征值也主要分布在 2 个数值区间。其中，油纸尖端缺陷分布在 $(0, 0.002)$ 和 $(0.002, 0.010)$ 区间；油纸悬浮缺陷分布在 $(0, 0.004)$ 和 $(0.004, 0.010)$ 区间；油纸沿面缺陷分布在 $(0, 0.0035)$ 和 $(0.0035, 0.0200)$ 区间。由此可知 3 种油纸绝缘缺陷的局放和干扰信号能量累积函数值存在差异，故可以作为干扰信号抑制的频域特征值。

表 4 油纸尖端缺陷 UHF 信号频域特征

Table 4 Frequency domain characteristics of oil-paper tip defect UHF signal

| 频域特征值 | 不同传感器布置方式的信号样本占比/% | | | |
|------------------|--------------------|----|----|----|
| | ① | ② | ③ | ④ |
| $(0, 0.002)$ | 96 | 92 | 89 | 88 |
| $(0.002, 0.010)$ | 4 | 8 | 11 | 12 |

2.2 局放信号抗干扰处理

常规 K -means 法虽然可随机选取初始聚类中心

表 5 油纸悬浮缺陷 UHF 信号频域特征

Table 5 Frequency domain characteristics of oil-paper suspension defect UHF signal

| 频域特征值 | 不同传感器布置方式的信号样本占比/% | | | |
|------------------|--------------------|----|----|----|
| | ① | ② | ③ | ④ |
| $(0, 0.004)$ | 95 | 93 | 90 | 89 |
| $(0.004, 0.010)$ | 5 | 7 | 10 | 11 |

表 6 油纸沿面缺陷 UHF 信号频域特征

Table 6 Frequency domain characteristics of oil-paper surface defect UHF signal

| 频域特征值 | 不同传感器布置方式的信号样本占比/% | | | |
|--------------------|--------------------|----|----|----|
| | ① | ② | ③ | ④ |
| $(0, 0.0035)$ | 94.5 | 91 | 89 | 86 |
| $(0.0035, 0.0200)$ | 5.5 | 9 | 11 | 14 |

K ，但无法保证聚类效果。为了提高 UHF 局放信号识别效果，文中在常规 K -means 的基础上，采用肘点法选取最优 K 值。误差平方和 (sum of the squared errors, SSE) D_{SSE} 可以评估聚类效果：

$$D_{SSE} = \sum_{w=1}^K \sum_{j=1}^{C_w} |p_{jw} - m_w|^2 \quad (4)$$

式中： K 为聚类中心数量； C_w 为第 w 个簇包含散点的数量； p_{jw} 为第 w 个簇中的第 j 个散点； m_w 为第 w 个簇的聚类中心。 D_{SSE} 越小则聚类效果越好。聚类中心 K 取 1 到 10，分别求 D_{SSE} 值，不同聚类中心的 D_{SSE} 值如图 6 所示。

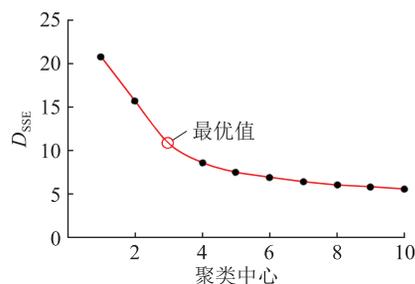


图 6 不同聚类中心的 D_{SSE} 值

Fig.6 D_{SSE} value of different cluster centers

根据肘点法原理：当聚类个数未达到最优个数 K 时，随着聚类个数的增加， D_{SSE} 下降较快。达到最优个数以后， D_{SSE} 下降缓慢，其斜率骤减处即为最优 K 值。由图 6 可知，在聚类中心为 3 时，斜率最大，即 D_{SSE} 下降最快，且聚类中心大于 3 后， D_{SSE} 下降缓慢，故最优 K 值为 3。基于 SSE 优化 K -means 的干扰信号抑制算法流程如图 7 所示。

3 种典型油纸绝缘缺陷 UHF 信号特征可视化聚类结果如图 8 所示，以 1 号与 2 号传感器监测信号为分析对象，横坐标 UHF-1 和纵坐标 UHF-2 分别为 UHF 通道 1 和 UHF 通道 2 的时频域特征聚类结

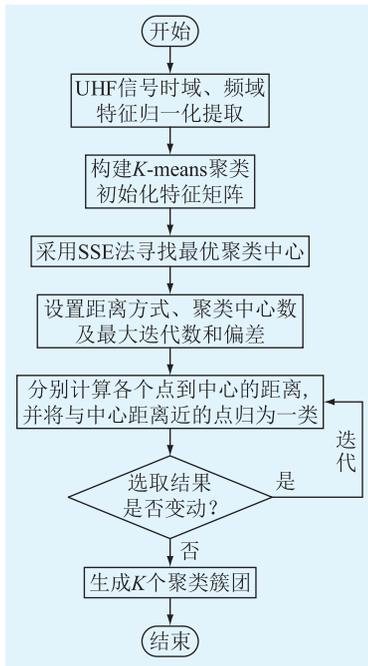


图7 基于SSE优化K-means的干扰信号抑制算法流程

Fig.7 The process of interference signal suppression algorithm based on SSE optimization K-means

果参数。其中数据样本分为3个簇团,油纸尖端缺陷聚类1簇团有688个样本点,聚类2簇团有42个样本点,聚类3簇团有20个样本点;油纸悬浮缺陷聚类1簇团有77个样本点,聚类2簇团有641个样本点,聚类3簇团有32个样本点;油纸沿面缺陷聚类1簇团有185个样本点,聚类2簇团有508个样本点,聚类3簇团有57个样本点。分析图8可知,油纸悬浮、尖端和沿面缺陷的聚类各个簇团皆呈现明显的分界,可通过选择局放簇团对应的样本数据进行局放定位,达到抑制干扰信号的目的,因此,采用时频域特征参数进行聚类分析,可实现局放信号和干扰信号的快速分类处理。

为抑制干扰信号,文中提出以聚类分界阈值 α 作为干扰信号的抑制判据,该参数由选取的时频域特征决定。选取两聚类簇团为研究对象,若信号总数为 N ,聚类1为 $X_1(k)$,聚类2为 $Y_1(k)$,聚类分界阈值 α 为:

$$\alpha = \frac{\max(X_1(k)) + \min(Y_1(k))}{2} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中: $X_1(k)$ 为通道UHF-1信号时频域特征序列; $Y_1(k)$ 为通道UHF-2信号时频域特征序列。

2.3 最优修正系数 L 选取

图8中聚类1、2、3簇团存在聚类分界样本混叠现象,聚类分界样本混叠局部放大如图9所示。

由于聚类中心局部存在混叠现象,混叠样本会

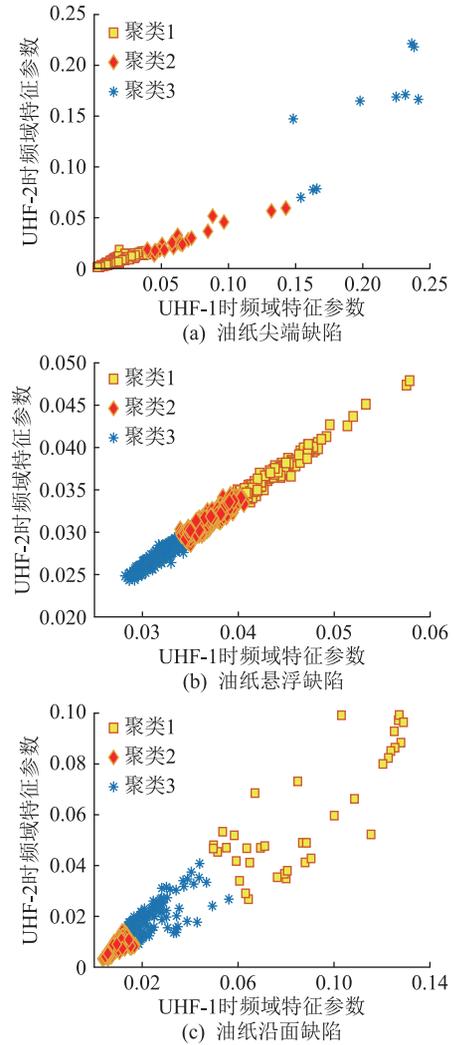


图8 油纸绝缘缺陷UHF信号特征可视化聚类结果

Fig.8 Visual clustering results of UHF signal characteristics of oil-paper insulation defects

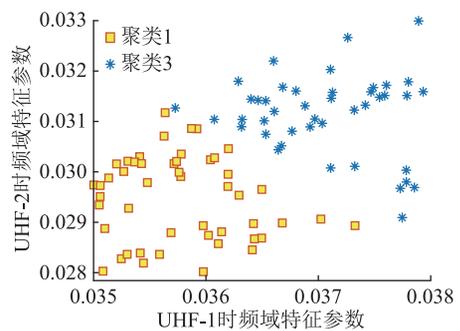


图9 聚类分界样本混叠现象

Fig.9 Clustering demarcation sample aliasing

影响聚类分界阈值 α 的选取,从而降低干扰信号的抑制效果,因此需要解决聚类样本的混叠问题。为此,文中引入修正系数 L ,修正聚类分界阈值 α ,处理局放样本的混叠问题,如式(6)所示。

$$\bar{\alpha} = L\alpha \quad (6)$$

式中: L 为修正系数; $\bar{\alpha}$ 为修正聚类分界阈值,修正系数的取值由样本特征决定,当修正系数 L 为1.0

时, $\bar{\alpha} = \alpha$ 。计算当修正系数 L 分别取 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 时, 局放抗干扰效果, 其中油纸尖端、悬浮和沿面缺陷干扰信号抑制结果如表 7—表 9 所示。

表 7 油纸尖端缺陷干扰信号抑制结果
Table 7 Interference signal suppression results of oil-paper tip defect

| 方法 | 抑制干扰信号个数 | | | | |
|------------------|----------|-----|-----|-----|-----|
| | ① | ② | ③ | ④ | |
| 文中方法 | $L=0.8$ | 20 | 24 | 29 | 37 |
| | $L=0.9$ | 32 | 37 | 41 | 50 |
| | $L=1.0$ | 49 | 53 | 62 | 59 |
| | $L=1.1$ | 70 | 80 | 120 | 110 |
| | $L=1.2$ | 250 | 220 | 240 | 242 |
| 常规 K -means 方法 | 275 | 250 | 264 | 256 | |

表 8 油纸悬浮缺陷干扰信号抑制结果
Table 8 Interference signal suppression results of oil-paper suspension defect

| 方法 | 抑制干扰信号个数 | | | | |
|------------------|----------|-----|-----|-----|-----|
| | ① | ② | ③ | ④ | |
| 文中方法 | $L=0.8$ | 30 | 39 | 47 | 23 |
| | $L=0.9$ | 48 | 57 | 68 | 51 |
| | $L=1.0$ | 61 | 70 | 92 | 76 |
| | $L=1.1$ | 110 | 118 | 125 | 111 |
| | $L=1.2$ | 216 | 247 | 233 | 224 |
| 常规 K -means 方法 | 237 | 256 | 282 | 260 | |

表 9 油纸沿面缺陷干扰信号抑制结果
Table 9 Interference signal suppression results of oil-paper surface defect

| 方法 | 抑制干扰信号个数 | | | | |
|------------------|----------|-----|-----|-----|-----|
| | ① | ② | ③ | ④ | |
| 文中方法 | $L=0.8$ | 35 | 46 | 60 | 66 |
| | $L=0.9$ | 39 | 53 | 67 | 74 |
| | $L=1.0$ | 47 | 66 | 73 | 80 |
| | $L=1.1$ | 90 | 110 | 135 | 141 |
| | $L=1.2$ | 206 | 277 | 289 | 299 |
| 常规 K -means 方法 | 237 | 264 | 322 | 338 | |

分析表 7—表 9 可知, 聚类分界阈值参数的选取决定干扰信号抑制的个数, 当 L 大于 1.0 时, 抑制干扰信号个数大量增加, 获得的局放信号虽然含干扰信号很少, 但其中也有大量 UHF 局放信号被剔除, 例如传感器布置①的油纸沿面缺陷 UHF 信号, L 等于 1.2 时干扰信号抑制个数达到了 277 个, UHF 局放信号丢失严重, 基于该局放信号进行局放定位无法保证定位有效性。

当 L 小于 1.0 时, 干扰信号抑制效果较低, L 越小, 定位所用信号中包含的干扰信号越多, 例如传感器布置的油纸尖端缺陷 UHF 信号, L 等于 0.8 时

干扰信号抑制个数只有 20 个, 难以满足局放定位要求。若采用常规 K -means 方法, 干扰信号抑制个数较多, 最多达到了 338 个, 虽然抑制干扰信号个数进一步增加, 但被抑制信号中包含部分局放信号, 该部分信号被剔除后, 导致可用数据样本数降低, 进而降低局放定位准确性。综上, 为了达到更好的抗干扰效果, 需进一步确定修正系数 L 的最优取值。

3 局放抗干扰定位方法验证

分别采用常规 K -means 方法和不同修正系数 L 取值的修正聚类分界方法, 进行干扰信号抑制, 然后计算 UHF 信号的局放起始时刻, 获得 TDOA 确定局放位置, 最后通过比较不同处理方法的时差定位位置与实际缺陷位置间的距离误差^[37-38], 验证文中方法的有效性以及获得修正系数 L 的最优取值。UHF 局放信号时差比较定位法如图 10 所示, 由于 UHF 信号波头起始位置识别的准确性对时差定位误差影响较大, 文中时差定位时, 首先计算每一个局放信号的时差, 然后以所有局放信号的时差期望值为 UHF 传感器的时差, 定位局放位置, 减小波头识别对定位的影响。

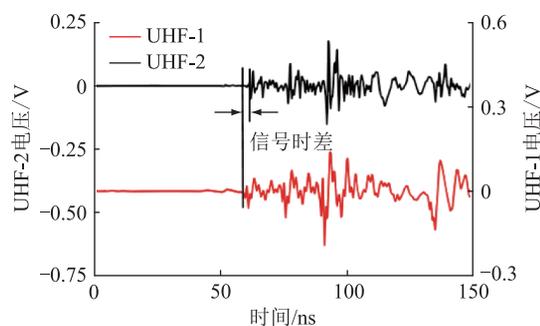


图 10 UHF 局放信号时差比较定位法

Fig.10 Time difference comparison positioning method of UHF partial discharge signal

由于信号能量与电压平方成正比, 可将 UHF 信号的电压波形转化为能量累积波形。当局部放电信号远大于背景噪声时, 在能量累积差值波形上会产生明显的拐点, 该拐点即可视为局部放电发生的起始时刻, 将能量累积函数减去每点的平均能量:

$$S'_k = S_k - p_{ave} = \sum_{n=1}^K u_n^2 - k \sum_{n=1}^N \frac{u_n^2}{N} \quad (7)$$

式中: S'_k 为能量差值函数; S_k 为能量函数; p_{ave} 为每点的平均能量; u_n 为信号电压幅值。针对文中 UHF 传感器布置方式, 时差定位如式 (18) 所示。

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (8)$$

式中: ΔT 为信号时差; T_1 、 T_2 分别为传感器 1 和传感器 2 每个局放信号起始时刻值。根据聚类分界特征

得出抗干扰判据,油纸绝缘缺陷 UHF 信号时差定位统计结果如表 10—表 12 所示。

表 10 油纸尖端缺陷局放信号时差计算结果
Table 10 Oil-paper tip defect time difference calculation results of partial discharge signal

| 方法 | 局放信号时差计算结果 $\Delta T/\text{ns}$ | | | | |
|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
| | ① | ② | ③ | ④ | |
| 文中方法 | $L=0.8$ | 2.12 | 1.82 | 1.58 | 1.42 |
| | $L=0.9$ | 1.58 | 1.45 | 1.32 | 1.15 |
| | $L=1.0$ | 1.18 | 0.84 | 0.71 | 0.61 |
| | $L=1.1$ | 0.65 | 0.52 | 0.31 | 0.25 |
| | $L=1.2$ | 0.66 | 0.54 | 0.33 | 0.26 |
| 常规 K -means 方法 | 2.81 | 2.75 | 2.56 | 2.53 | |

表 11 油纸悬浮缺陷局放信号时差计算结果
Table 11 Oil-paper suspension defect time difference calculation results of partial discharge signal

| 方法 | 局放信号时差计算结果 $\Delta T/\text{ns}$ | | | | |
|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
| | ① | ② | ③ | ④ | |
| 文中方法 | $L=0.8$ | 2.02 | 1.91 | 1.48 | 1.32 |
| | $L=0.9$ | 1.62 | 1.47 | 1.29 | 1.05 |
| | $L=1.0$ | 1.01 | 0.84 | 0.69 | 0.58 |
| | $L=1.1$ | 0.66 | 0.55 | 0.44 | 0.28 |
| | $L=1.2$ | 0.65 | 0.57 | 0.45 | 0.29 |
| 常规 K -means 方法 | 2.84 | 2.77 | 2.59 | 2.51 | |

表 12 油纸沿面缺陷局放信号时差计算结果
Table 12 Oil-paper surface defect time difference calculation results of partial discharge signal

| 方法 | 局放信号时差计算结果 $\Delta T/\text{ns}$ | | | | |
|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
| | ① | ② | ③ | ④ | |
| 文中方法 | $L=0.8$ | 2.06 | 1.82 | 1.45 | 1.22 |
| | $L=0.9$ | 1.72 | 1.37 | 1.26 | 1.01 |
| | $L=1.0$ | 1.13 | 0.81 | 0.66 | 0.52 |
| | $L=1.1$ | 0.86 | 0.52 | 0.42 | 0.29 |
| | $L=1.2$ | 0.75 | 0.56 | 0.41 | 0.30 |
| 常规 K -means 方法 | 2.64 | 2.88 | 2.71 | 2.92 | |

由表 10—表 12 可知,油纸缺陷 UHF 局放信号定位结果中,当 L 大于 1.0 时,不同传感器放置方式,在 L 取 1.0~1.1 范围时,信号时差显著降低,传感器布置④的油纸尖端缺陷信号时差只有 0.25 ns,由于各传感器与局放源放置距离相同,故信号时差越小,则定位误差越小,即 L 取 1.0~1.1 范围时,局放识别准确度显著提高。但 L 取 1.1~1.2 范围时,信号时差减小不太显著,验证了 2.3 节分析结论, L 在该区间内,干扰信号的抑制已经趋于饱和。

当 L 小于 1.0 时,信号时差显著增大,油纸尖端缺陷传感器布置①的信号时差甚至达到了 2.12 ns。一方面,当 L 小于 1.0 时,大量干扰信号样本点由于

混叠问题被视作局放信号,干扰信号的抑制率随着 L 减小而快速降低;另一方面论证了干扰信号的存在会严重降低定位准确性。

对比文中方法与常规 K -means 方法定位结果,采用常规 K -means 处理的局放信号定位误差较大,不同传感器布置方式下,定位误差都超过了 0.7 m,无法满足变压器油纸绝缘缺陷局放精准定位的要求。综上所述,采用修正聚类分界可提高油纸绝缘缺陷局放抗干扰定位精度,聚类分界修正系数 L 的最优取值应为 1.1。

4 不同传感器布置方式的定位误差规律

4.1 不同传感器布置方式的定位误差理论分析

局部放电信号从局放源传播到 UHF 传感器的第 i 个传感器的时刻记为 t_i ,设第 i 个传感器的三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,局部放电源的坐标为 (x, y, z) ,由空间几何分析可得定位方程组:

$$\begin{cases} c\Delta t_{12} = d_1 - d_2 \\ c\Delta t_{13} = d_1 - d_3 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Delta t_{1i} = t_1 - t_i \\ c = 3.0 \times 10^8 \\ d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: Δt_{1i} 为第 i 个传感器接收到局部放电信号的时间和第 1 个传感器接收到局部放电信号起始时刻的时差; c 为电磁波传播速度; d_i 为局部放电源到第 i 个传感器的距离。

用牛顿迭代等方法求解式(9),即可得到局部放电源的位置坐标 (x, y, z) 。由式(9)可知,系统定位误差主要来源于传感器接收信号波头时刻的误差,而且与传感器阵列的空间布置方式有一定关系。

将式(10)代入式(9),并对式(9)两边同时求微分,得到矩阵:

$$cd_1 = Jd_x \quad (11)$$

式中: $d_1 = (d\Delta t_{12}, d\Delta t_{13})^T$ 为接收信号时延序列的误差, d 为求取该数值误差; $d_x = (d_x, d_y, d_z)^T$ 为系统的定位误差, d_x, d_y, d_z 分别为系统在各坐标轴的定位误差; J 如式(12)所示。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{x - x_1}{d_1} - \frac{x - x_2}{d_2} & \frac{y - y_1}{d_1} - \frac{y - y_2}{d_2} & \frac{z - z_1}{d_1} - \frac{z - z_2}{d_2} \\ \frac{x - x_1}{d_1} - \frac{x - x_3}{d_3} & \frac{y - y_1}{d_1} - \frac{y - y_3}{d_3} & \frac{z - z_1}{d_1} - \frac{z - z_3}{d_3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式(11)得:

$$\mathbf{d}_x = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{c} d_i \quad (13)$$

$$\mathbf{d}_x \mathbf{d}_x^T = \mathbf{c}^2 \mathbf{J}^{-1} \mathbf{d}_i \mathbf{d}_i^T (\mathbf{J}^{-1})^T \quad (14)$$

记 $\mathbf{P}_{dX} = \mathbf{d}_x \mathbf{d}_x^T$, 用 2-范数评估定位误差。

$$\|\mathbf{d}_x\|_2 = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} = \sqrt{\text{tr } \mathbf{P}_{dX}} \quad (15)$$

由式(13)一式(15)知,定位误差和信号的时延序列误差 d_i 、信号源到各传感器的相对位置有关。若在 d_i 一定时,假设 $\|\mathbf{d}_x\|_2 = \sigma_i^2$,可得出文中 UHF 定位误差为:

$$\|\mathbf{d}_x\|_2 \geq 3c\sigma_i^2 \bar{d} / \sqrt{\sum_{i=2}^3 d_{1i}^2} \quad (16)$$

式中: $\bar{d} = (d_1 + d_2 + d_3) / 3$, 为局部放电源到传感器阵列的平均位置; d_{1i} 为传感器 1 到传感器 i 的距离。由式(16)可知,信号源到达传感器时差的误差越小,定位误差越小;局部放电源的位置到传感器阵列的距离越近,定位误差越小;传感器之间间隔距离越远,即 d_{1i} 越大,定位误差 $\|\mathbf{d}_x\|_2$ 会越小。

4.2 不同传感器布置方式的定位误差实验分析

不同传感器布置方式的油纸绝缘缺陷 UHF 定位误差如图 11 所示。

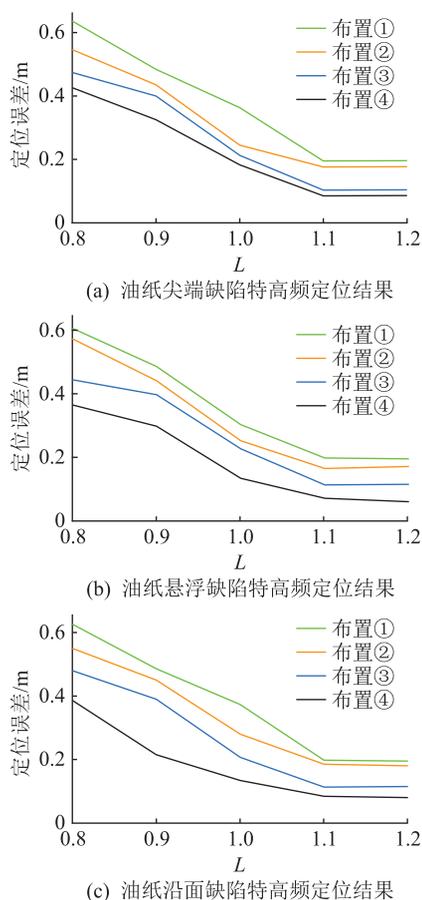


图 11 不同传感器布置方式油纸绝缘缺陷 UHF 定位结果
Fig.11 UHF positioning results of oil-paper insulation defects with different sensor layout

对比 4 种不同传感器放置方式可知,传感器布置④局放定位误差最小,油纸尖端缺陷局放定位误差可降低至 0.075 m;油纸悬浮缺陷局放定位误差可降低至 0.084 m;油纸沿面缺陷局放定位误差可降低至 0.087 m。由此可知油纸绝缘缺陷局放检测传感器布置越分散,定位误差越小。由不同缺陷局放信号时域特征可知,信号 TDOA 计算准确性决定定位误差的大小,由于不同局放缺陷受干扰信号影响程度不同,故局放脉冲起始点位置的计算准确性也不同,所以不同局放缺陷的定位误差存在差异。

由以上分析可知,变压器油纸绝缘缺陷局放检测有效性不仅与干扰信号影响程度有关,还与传感器布置方式有关,对于变压器油纸绝缘局放检测,UHF 传感器应尽量分散布置,以达到降低定位误差的目的。

综上,推荐变压器的传感器布置方式③和④,尽量增大相邻传感器的布置间隔角度,应不小于 90°。该布置方式一方面确保了油纸绝缘缺陷局部放电信号能够被完整的捕捉,另一方面也保证了局放定位精度。

5 结论

文中提出了基于修正聚类分界的变压器油纸绝缘缺陷局放抗干扰定位方法,选取能量累积函数和功率谱密度作为抗干扰信号处理的时频域特征参数。引入聚类分界修正系数 L ,其最优值为 1.1,解决了聚类样本混叠问题,与常规 K -means 方法相比,定位误差可降低至 0.1 m 以内,进一步提高了变压器油纸绝缘缺陷的局放定位精度。

文中研究了油纸绝缘缺陷局放定位误差随传感器布置方式的变化规律,得出 UHF 传感器布置方式④的定位误差最小,可降低至 0.075 m。UHF 传感器布置越分散,定位误差越小。现场应用中,可选择传感器布置方式③和④,尽量增大相邻传感器的布置间隔角度,应不小于 90°。

参考文献:

[1] 唐炬,胡晶晶,许中荣,等. 变压器局部放电超高频检测影响因素分析[J]. 重庆大学学报,2008,31(2):150-154.
TANG Ju, HU Jingjing, XU Zhongrong, et al. Factors of influence on partial discharge ultra-high frequency detection in transformer[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(2): 150-154.

[2] 刘顺成,向加佳,陈剑,等. 局部放电特高频检测校准影响因素研究[J]. 电力工程技术,2021,40(3):128-134.
LIU Shuncheng, XIANG Jiajia, CHEN Jian, et al. Calibration influence factors of UHF partial discharge detector[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 128-134.

- [3] 董冰冰,陶磊,李志兵,等. 机械式直流断路器换流支路用气体间隙开关方案及其诱导击穿特性[J]. 高电压技术,2022,48(12):4863-4872.
DONG Bingbing,TAO Lei,LI Zhibing,et al. A gas gap switch scheme for commutation branch of DC circuit breakers and its induced breakdown characteristics[J]. High Voltage Engineering,2022,48(12):4863-4872.
- [4] MA G M,ZHOU H Y,SHI C,et al. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted FBG[J]. IEEE Sensors Journal,2018,18(7):2788-2795.
- [5] 陈晓琳,符小桃,吴乾东,等. 基于频域介电谱的油纸绝缘套管局部受潮诊断研究[J]. 电力工程技术,2022,41(2):149-155.
CHEN Xiaolin,FU Xiaotao,WU Qiangdong,et al. Partial damp diagnostic method of oil-paper insulating bushing based on frequency domain spectroscopy[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(2):149-155.
- [6] 孙汝羿,袁至,王维庆,等. 含固态变压器新型配电网动态无功多目标优化[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(16):104-114.
SUN Ruyi,YUAN Zhi,WANG Weiqing,et al. Multi-objective optimization of dynamic reactive power in a new distribution network with a solid state transformer[J]. Power System Protection and Control,2023,51(16):104-114.
- [7] 肖智刚,董明,邓彦国,等. 变压器内置式超高频传感器安装位置选择仿真研究[J]. 绝缘材料,2014,47(5):76-81,86.
XIAO Zhigang,DONG Ming,DENG Yanguo,et al. Simulation study on selection of install location for UHF sensor in power transformer[J]. Insulating Materials,2014,47(5):76-81,86.
- [8] KIM M,LEE J H,KOO J Y,et al. A study on internal temperature monitoring system for power transformer using optical fiber Bragg grating sensors[C]//2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2008). Yokkaichi,Japan. IEEE,2008:163-166.
- [9] 陈钜栋,江军,杨小平,等. 油浸式高压套管局部放电非接触式特高频检测[J]. 电力工程技术,2021,40(1):147-154.
CHEN Judong,JIANG Jun,YANG Xiaoping,et al. Non-contact partial discharge detection of high voltage oil-impregnated-paper bushing based on UHF technology[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(1):147-154.
- [10] 蒋凌峰,杨鑫,吴文锋,等. 10 kV 架空线路和配电变压器绝缘水平差异的调节方法[J]. 电瓷避雷器,2022(2):20-30.
JIANG Lingfeng,YANG Xin,WU Wenfeng,et al. Adjustment method for the difference of insulation level between 10 kV overhead line and distribution transformer[J]. Insulators and Surge Arresters,2022(2):20-30.
- [11] 蔡文方,聂玲,应光耀,等. 振动分析法在变压器故障诊断及隐患治理中的应用[J]. 浙江电力,2022,41(2):53-59.
CAI Wenfang,NIE Ling,YING Guangyao,et al. Application of vibration analysis in transformer fault diagnosis and hidden peril management[J]. Zhejiang Electric Power,2022,41(2):53-59.
- [12] 刘展程,王爽,唐波. 基于布谷鸟搜索算法和 DBN 模型的变压器故障识别[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(2):3-11.
LIU Zhancheng,WANG Shuang,TANG Bo. Transformer fault identification based on the cuckoo search algorithm and DBN model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(2):3-11.
- [13] 董冰冰,宋家乐,李特,等. 强暴雨条件下 110 kV 硅橡胶绝缘子雷电冲击电弧发展过程与闪络特性[J]. 高电压技术,2023,49(2):525-535.
DONG Bingbing,SONG Jiale,LI Te,et al. Lightning impulse arc development process and flashover characteristics of 110 kV SIR insulators under heavy rainstorms[J]. High Voltage Engineering,2023,49(2):525-535.
- [14] 胡恩德,赵伟苗,许甜田,等. 变压器油中硫腐蚀对绕组匝间绝缘局部放电特性的影响研究[J]. 高压电器,2020,56(1):216-223.
HU Ende,ZHAO Weimiao,XU Tiantian,et al. Effect of sulfur corrosion on the characteristic of partial discharge in turn-to-turn winding insulation in power transformer[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(1):216-223.
- [15] 董冰冰,郭志远,文韬,等. 两级沿面触发型气体开关等离子体喷射过程与触发导通规律[J]. 高电压技术,2022,48(11):4656-4666.
DONG Bingbing,GUO Zhiyuan,WEN Tao,et al. Development process of jet plasma of two-stage surface-triggered gas switch and its trigger conduction law[J]. High Voltage Engineering,2022,48(11):4656-4666.
- [16] 董冰冰,陈子建,陈维江,等. 配电网用灵活控制特快速开关方案及其触发导通特性[J]. 高电压技术,2022,48(5):1808-1816.
DONG Bingbing,CHEN Zijian,CHEN Weijiang,et al. Scheme of flexible control very fast switch and its discharge characteristics for distribution network[J]. High Voltage Engineering,2022,48(5):1808-1816.
- [17] 贺兰菲,熊川羽,马莉,等. 考虑寿命差异化现象的变压器寿命预测方法研究[J]. 供用电,2022,39(9):93-100.
HE Lanfei,XIONG Chuanyu,MA Li,et al. Research on transformer lifetime prediction method considering difference of lifetime distribution[J]. Distribution & Utilization,2022,39(9):93-100.
- [18] 林志超,孙荣可,丘桢坤,等. 配电变压器台区接地故障对低压系统暂态转移过电压分析[J]. 供用电,2022,39(6):33-39.
LIN Zhichao,SUN Rongke,QIU Zhenkun,et al. Analysis on transient transfer overvoltage of low voltage system caused by grounding fault in distribution transformer area[J]. Distribution & Utilization,2022,39(6):33-39.
- [19] 李臻,罗林根,盛戈啤,等. 基于压缩感知的特高频局部放电定位法[J]. 电工技术学报,2018,33(1):202-208.
LI Zhen,LUO Lingen,SHENG Gehao,et al. Ultrahigh frequency partial discharge localization methodology based on com-

- pressed sensing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 202-208.
- [20] MIRZAEI H R, AKBARI A, GOCKENBACH E, et al. A novel method for ultra-high-frequency partial discharge localization in power transformers using the particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(2): 26-39.
- [21] 郁琦琛, 罗林根, 贾廷波, 等. 特高频信号 RSSI 统计分析下的变电站空间局部放电定位技术[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4163-4171.
- YU Qichen, LUO Lingen, JIA Tingbo, et al. Partial discharge positioning technology in substation based on received signal strength indicator statistical analysis of UHF signal[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4163-4171.
- [22] MOORE P J, PORTUGUES I E, GLOVER I A. Radiometric location of partial discharge sources on energized high-voltage plant[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2264-2272.
- [23] GHOSH R, CHATTERJEE B, DALAI S. A method for the localization of partial discharge sources using partial discharge pulse information from acoustic emissions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 237-245.
- [24] AL-MASRI W M F, ABDEL-HAFEZ M F, EL-HAG A H. A novel bias detection technique for partial discharge localization in oil insulation system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(2): 448-457.
- [25] 李鹏, 毕建刚, 于浩, 等. 变电设备智能传感与状态感知技术及应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3097-3113.
- LI Peng, BI Jiangang, YU Hao, et al. Technology and application of intelligent sensing and state sensing for transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3097-3113.
- [26] HAO L, LEWIN P L, HUNTER J A, et al. Discrimination of multiple PD sources using wavelet decomposition and principal component analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1702-1711.
- [27] 贾亚飞, 朱永利, 高佳程, 等. 基于样本加权 FCM 聚类的未知类别局部放电信号识别[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 107-112.
- JIA Yafei, ZHU Yongli, GAO Jiacheng, et al. Recognition of unknown partial discharge signals based on sample-weighted FCM clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 107-112.
- [28] 罗沙, 田宇, 李宾宾, 等. 基于尺度-能量熵特征对的特高频局部放电辨识方法[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 152-158.
- LUO Sha, TIAN Yu, LI Binbin, et al. Pattern recognition of ultra-high frequency partial discharge by using scale parameters-energy entropy characteristic pairs[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 152-158.
- [29] 刘宇舜, 程登峰, 殷巧玲, 等. 基于 EEMD 与边际谱能量的电缆局部放电定位方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 156-164.
- LIU Yushun, CHENG Dengfeng, YIN Qiaoling, et al. Cable partial discharge location method based on EEMD and marginal spectral energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 156-164.
- [30] 熊俊, 杨森, 侯慧娟, 等. 基于特高频传感阵列的局部放电定位误差分析及优化布置[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 20-25, 31.
- XIONG Jun, YANG Sen, HOU Huijuan, et al. Error analysis and placement optimization of partial discharge location based on UHF sensors array[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 20-25, 31.
- [31] 徐越峰, 任双赞, 朱明晓, 等. 基于特高频天线阵列的局部放电信号定位方法及影响因素分析[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 53-60.
- XU Yuefeng, REN Shuangzan, ZHU Mingxiao, et al. Localization of partial discharge signals based on ultra-high-frequency antenna array and analysis of influence factors[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 53-60.
- [32] FAN X H, LIU J F, LAI B H, et al. FDS measurement-based moisture estimation model for transformer oil-paper insulation including the aging effect[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.
- [33] 蒋平, 史豪, 吴熙. 风电功率波动引发的强迫振荡扰动源定位方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 1-6.
- JIANG Ping, SHI Hao, WU Xi. Localizing disturbance source of power system forced oscillation caused by wind power fluctuation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 1-6.
- [34] 沈子珪, 袁晓玲. 基于并行化 K-means 的综合能源服务客户识别[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 107-113.
- SHEN Ziyao, YUAN Xiaoling. Implementation of integrated energy service for customer identification based on parallel K-means clustering[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 107-113.
- [35] 陆云才, 胡汉巧, 蔚超, 等. 基于超声波法的变压器重症监护系统研制及应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 94-98.
- LU Yuncai, HU Hanqiao, WEI Chao, et al. Development and application of transformer intensive care system based on ultrasonic method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 94-98.
- [36] 王磊, 张磊, 牛荣泽, 等. 基于 CNN+D-S 证据理论的多维信息源局部放电故障识别[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 172-179.
- WANG Lei, ZHANG Lei, NIU Rongze, et al. Partial discharge fault identification of multi-dimensional information sources based on CNN+D-S evidence theory[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 172-179.
- [37] 陈皇熹, 方春华, 普子恒, 等. 基于 VMD-WVD 相位法的长电缆局放双端定位[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 171-177.

CHEN Huangxi, FANG Chunhua, PU Ziheng, et al. Double-ended positioning of partial discharge for long cable based on VMD-WVD phase method [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 171-177.

[38] 徐学伟, 李静鹏, 马驰, 等. 基于 UHF 信号特征参数指纹图谱的局部放电定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 84-91.

XU Xuwei, LI Jingpeng, MA Chi, et al. A partial discharge localization method based on fingerprint spectrum of UHF signal feature parameter [J]. Power System Protection and Control,

2019, 47(24): 84-91.

作者简介:



董冰冰

董冰冰(1987),男,博士,副研究员,研究方向为电力设备在线监测与故障诊断,放电理论与试验(E-mail: bndong@126.com);

李秉华(2000),男,硕士在读,研究方向为变压器在线监测与故障诊断;

高常胜(1997),男,硕士在读,研究方向为GIS在线监测与故障诊断。

UHF anti-interference positioning and optimal layout method of oil-paper insulation defect partial discharge

DONG Bingbing, LI Binghua, GAO Changsheng

(Hefei University of Technology (Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving), Hefei 230009, China)

Abstract: Ultra high frequency (UHF) partial discharge (PD) detection is a common method for transformer oil-paper insulation defect location. However, the accuracy of PD positioning in practical application is easily affected by noise and sensor layout. In order to ensure the effectiveness of PD positioning detection of transformer oil-paper insulation defect, an UHF PD positioning detection platform for oil-paper insulation defects is established. Based on the conventional K -means method, a modified clustering demarcation PD anti-interference positioning method is proposed, which effectively reduces the positioning error. Aiming at the problem of sample clustering demarcation aliasing, when the optimal correction coefficient L is 1.1, the UHF PD positioning error can be reduced to less than 0.1 m, which verifies the effectiveness of the proposed method. Finally, the variation law of positioning error of different sensor layout is analyzed, and the optimal layout scheme of UHF sensor for transformer oil-paper insulation defect detection is proposed, which can provide reference for the layout and positioning of transformer on-line monitoring sensor.

Keywords: transformer; oil-paper insulation defects; ultra high frequency (UHF) detection; anti-interference; partial discharge positioning; clustering demarcation

(编辑 吴昊)